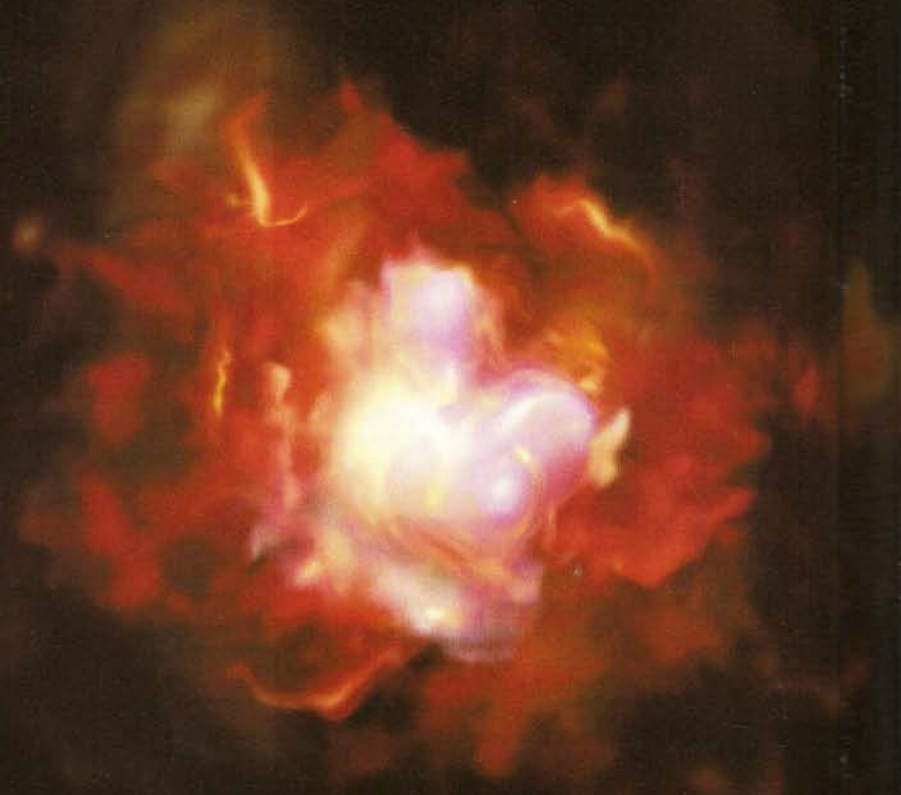


El universo antes de la gran explosión

Gabriele Veneziano



La teoría de cuerdas da a entender
que la gran explosión no fue el origen del universo,
sino sólo la evolución de un estado preexistente

¿Fue realmente la gran explosión el inicio del tiempo? ¿O el universo existía desde antes? Semejante pregunta parecía casi una blasfemia hace sólo una década. La mayoría de los cosmólogos sostenía que carecía de sentido, que contemplar un tiempo anterior a la gran explosión era como preguntarse por los lugares al norte del polo norte. Pero los desarrollos de la física teórica, especialmente la aparición de la teoría de cuerdas, han cambiado la perspectiva. El universo de antes de la explosión se ha convertido en la última frontera de la cosmología.

El nuevo afán de considerar lo que podría haber sucedido antes de la explosión es la última oscilación de un péndulo intelectual que ha ido y venido durante milenios. En una u otra forma, el problema del inicio ha atraído a filósofos y teólogos de casi todas las culturas. Está relacionado con un gran conjunto de interrogantes, uno de ellos famosamente resumido en un cuadro pintado en 1897 por Paul Gauguin: *D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?* ¿De dónde venimos? ¿Qué somos? ¿Adónde vamos? La obra representa el ciclo del nacimiento, vida y muerte—origen, identidad y destino de cada individuo—; estos interrogantes personales conectan directamente con los cósmicos. Podemos remontarnos por nuestro linaje más allá de las generaciones, más allá de nuestros ancestros animales, más allá de las primitivas formas de vida y de protovida, más allá de los elementos sintetizados en el universo primordial, más allá de la energía amorfa que aún antes ocupaba el espacio. ¿Se extiende nuestro árbol genealógico indefinidamente hacia atrás? ¿O bien sus raíces acaban? ¿Es el cosmos pasajero, como nosotros?

Los antiguos griegos debatieron con ardor sobre el origen del tiempo. Aristóteles, de parte de quienes no pensaban que hubiera habido un inicio, invocó el principio de que de la nada, nada puede salir. Si el universo no pudo pasar de la nada a algo, es que había existido siempre. Por esta y otras razones, el tiempo debía extenderse

eternamente en el pasado y en el futuro. Los teólogos cristianos mantenían el punto de vista opuesto. San Agustín afirmaba que Dios existe fuera del espacio y el tiempo, y puede llevarlos a la existencia de la misma manera que podía forjar otros aspectos de nuestro mundo. Cuando se le preguntaba qué hacía Dios *antes* de crear el mundo, Agustín respondía que, como el propio tiempo pertenece a la creación de Dios, no había un *antes*.

La teoría de la relatividad general de Einstein condujo a los cosmólogos modernos casi a la misma conclusión. La teoría mantiene que espacio y tiempo son “blandos”, maleables. A las mayores escalas, el espacio es dinámico por naturaleza; se expande o se contrae con el tiempo, arrastrando la materia como la marea arrastra un tronco. Los astrónomos hallaron en el decenio de 1920 que nuestro universo se está, ahora, expandiendo: las galaxias distantes se separan unas de otras. Una consecuencia, como Steven Hawking y Roger Penrose probaron en los años sesenta, es que el tiempo no se puede extender indefinidamente hacia atrás. Si se proyecta la historia cósmica hacia atrás en el tiempo, todas las galaxias se juntan en un único punto infinitesimal, una “singularidad”, casi como si estuvieran descendiendo en un agujero negro. Cada galaxia, o sus precursores, se comprime hasta un tamaño nulo. La densidad, la temperatura y la curvatura del espaciotiempo se hacen infinitas. La singularidad es el cataclismo primero, más allá del cual nuestra genealogía cósmica no se puede extender.

Extraña coincidencia

La singularidad inevitable pone en serios problemas a los cosmólogos. En particular, no encaja bien con el elevado grado de homogeneidad e isotropía que exhibe el universo a escalas grandes. Para que el cosmos parezca aproximadamente el mismo en todas partes, alguna clase de comunicación debe haber entre regiones distantes del espacio, para que se coordinen sus propiedades. Pero tal comunicación contradice el viejo paradigma cosmológico.

Para concretar, consideremos lo que ha sucedido durante los 13.700 millones de años transcurridos desde que se liberó la radiación del fondo cósmico de microondas. La distancia entre galaxias ha crecido en un factor de aproximadamente 1000 (a causa de la expansión), mientras que el radio del universo observable ha crecido en un factor mucho mayor, de alrededor de 100.000 (porque la luz es más veloz que la expansión). Hoy día vemos partes del universo que no podríamos haber visto hace 13.700 millones de años. En realidad, éste es el primer momento de la historia cósmica en que la luz de las galaxias más distantes ha llegado a la Vía Láctea.

Sin embargo, las propiedades de la Vía Láctea son básicamente las mismas que las de las galaxias distantes. Es como si se fuera a una fiesta y se comprobara que se lleva exactamente el mismo vestido que una docena de amigos. Si sólo dos estuvieran vestidos igual, se podría explicar como una coincidencia, pero una docena sugiere que los asistentes se han puesto de acuerdo. En cosmología, el número no es una docena, sino decenas de miles: el número de fragmentos de cielo independientes, aunque estadísticamente idénticos, del fondo de microondas.

Una posibilidad es que todas estas regiones del espacio estuvieran dotadas desde el inicio con idénticas propiedades; en otras palabras,

que la homogeneidad sea mera coincidencia. Sin embargo, se han concebido un par de circunstancias más naturales que nos librarían de ese callejón sin salida: o el universo primitivo era mucho menor de lo supuesto en la cosmología ordinaria, o mucho más viejo. Una u otra (o ambas, actuando juntas) habrían posibilitado la intercomunicación.

La preferida sigue siendo la primera. El universo habría pasado por un período de expansión acelerada, o de "inflación", al comienzo de su historia. Antes de esta fase, las galaxias, o sus precursores, estaban tan juntas, que fácilmente podían coordinar sus propiedades. Durante la inflación, perdieron el contacto debido a que la luz no podía seguir el paso de la frenética expansión. Cuando la inflación acabó, la expansión empezó a desacelerarse, de manera que las galaxias, gradualmente, volvieron a verse unas a otras.

Se atribuye el empuje inflacionario a la energía potencial almacenada en un nuevo campo, el inflatón, unos 10^{-35} segundos después de la gran explosión. La energía potencial, al contrario que la masa en reposo o la energía cinética, conduce a la repulsión gravitatoria. En vez de ralentizar la expansión, como haría la gravitación de la materia ordinaria, el inflatón la acelera. Propuesta en 1981, la inflación ha explicado con precisión una amplia variedad de observaciones [véase "El universo inflacionario", por Alan

H. Guth y Paul J. Steinhardt; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984]. Sin embargo, todavía quedan algunos problemas teóricos, empezando por el de qué es exactamente el inflatón y qué le dio una energía potencial inicial tan grande.

La segunda y menos conocida solución del problema prescinde de la singularidad. Si el tiempo no empezó en la explosión, si una larga era precedió al inicio de la presente expansión cósmica, la materia podría haber tenido todo el tiempo necesario para distribuirse homogéneamente por sí misma. De ahí que se haya reexaminado el razonamiento que llevó a inferir la existencia de una singularidad.

Una de sus hipótesis, que la teoría de la relatividad es válida siempre, resulta cuestionable. Cerca de la presunta singularidad, los efectos cuánticos deberían haber sido grandes, incluso dominantes. La relatividad ordinaria no tiene en cuenta tales efectos, de manera que aceptar la inevitabilidad de la singularidad equivale a fiarse de la teoría más allá de lo razonable. Para saber lo que realmente sucedió, hay que subsumir la relatividad en una teoría cuántica de la gravedad. La tarea ha venido ocupando a los teóricos desde la época de Einstein, pero el progreso fue casi nulo hasta mediados los años ochenta.

Evolución de una revolución

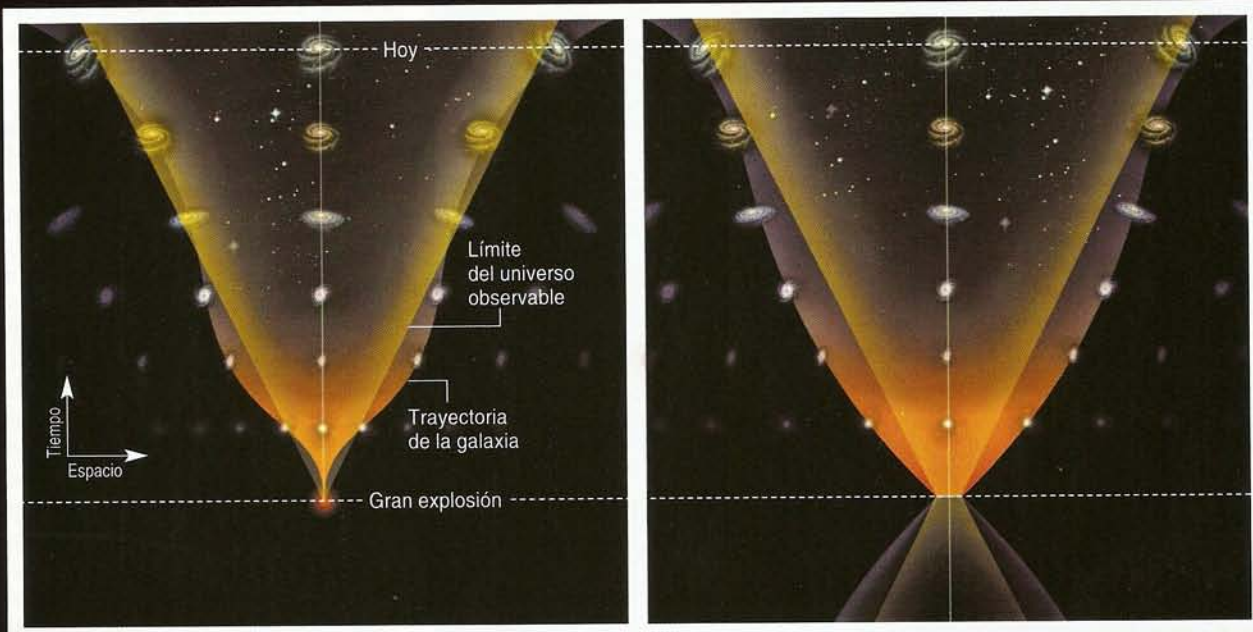
Hoy en día quedan dos enfoques: uno, la gravedad cuántica de bucles, mantiene la teoría de Einstein esencialmente intacta; pero cambia el procedimiento de llevarla a cabo en la mecánica cuántica [véase "Átomos del espacio y del tiempo", por Lee Smolin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2004]. Los seguidores de la gravedad cuántica de bucles han dado grandes pasos en los últimos años. A pesar de ello, su método podría no ser tan revolucionario como para resolver los problemas fundamentales de la cuantización de la gravedad. Un problema parecido afrontaron los teóricos de partículas después de que Enrico Fermi introdujera su teoría efectiva de la fuerza nuclear débil en 1934. Todos los esfuerzos por dar sentido a una versión cuántica de la teoría de Fermi fallaron. No se ne-

Resumen/Cosmología de cuerdas

- Filósofos, teólogos y científicos siempre han debatido si el tiempo es eterno o finito; es decir, si el universo ha existido siempre o ha tenido en cambio una génesis definida. La teoría de la relatividad general de Einstein implica finitud. Un universo en expansión tiene que haber empezado en la gran explosión.
- Sin embargo, la relatividad general pierde su validez en la vecindad de la explosión, momento en que interviene la mecánica cuántica. El principal candidato actual a una teoría cuántica de la gravedad completa, la teoría de cuerdas, introduce un cuanto de longitud mínimo como una nueva constante fundamental de la naturaleza y convierte con ello en insostenible que la gran explosión fuera una verdadera génesis.
- La explosión tuvo lugar, pero no correspondió a un momento de infinita densidad. El universo podría ser anterior a ella. Las simetrías de la teoría de cuerdas sugieren que el tiempo no tuvo un inicio y no tendrá un final. Podría haber empezado casi vacío y haberse ido concentrando hasta la explosión, o incluso podría haber pasado por un ciclo de muerte y renacimiento. En cualquier caso, la época anterior a la explosión habría formado el cosmos actual.

Dos concepciones del inicio

EN NUESTRO UNIVERSO EN EXPANSION, las galaxias se alejan unas de otras. Cualquier par de galaxias se separa a una velocidad proporcional a la distancia que media entre ambas: si distan 500 millones de años-luz entre sí, se separarán el doble de deprisa que si distan 250. Por tanto, las galaxias deben haber partido del mismo lugar al mismo tiempo: la gran explosión. La conclusión vale incluso cuando la expansión cósmica ha pasado por períodos de aceleración y desaceleración; en los diagramas del espaciotiempo (abajo) las galaxias siguen trayectorias serpenteantes que entran y salen de la región observable del espacio (cono amarillo). Sin embargo, la situación deviene incierta en el preciso momento en que las galaxias (o sus antecesores) empezaron a separarse.



En la cosmología estándar de la gran explosión, que se basa en la teoría general de la relatividad de Einstein, la distancia entre dos galaxias cualesquiera era nula hace un tiempo finito. Antes de dicho momento, el tiempo pierde sentido.

En modelos más complejos que incluyen efectos cuánticos, dos galaxias cualesquiera deben haber partido a una cierta distancia mínima una de otra. Estos modelos abren la posibilidad de un universo anterior a la explosión.

cesitaban nuevas técnicas de cálculo, sino las profundas modificaciones aportadas por la teoría electrodébil de Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam a finales de los años sesenta.

La segunda posibilidad, que considero más prometedora, es la teoría de cuerdas, una modificación verdaderamente revolucionaria de la teoría de Einstein. Este artículo se referirá a ella, aunque los proponentes de la gravedad cuántica de bucles afirman que están alcanzando muchas de las mismas conclusiones.

La teoría de cuerdas surgió a partir de un modelo que planteé en 1968 para describir el mundo de las partículas nucleares (protones y neutrones) y sus interacciones. Aunque apasionó en un principio, el modelo fracasó. Sería abandonado años después en favor de la cromodinámica

cuántica, que describe las partículas nucleares en términos de constituyentes más elementales, los quarks. Los quarks quedan confinados dentro de los protones o neutrones como si estuvieran ligados entre sí por cuerdas elásticas. Mirando hacia atrás, se comprende que la teoría de cuerdas original captó ese aspecto del mundo nuclear. Sólo más tarde reviviría en el empeño por combinar la relatividad general y la teoría cuántica.

La idea básica es que las partículas elementales no son puntos, sino objetos unidimensionales infinitamente delgados, las cuerdas. El gran zoo de las partículas elementales, cada una con sus propiedades características, refleja los muchos posibles modos de vibración de una cuerda. ¿Cómo puede una teoría tan simple describir el complicado mun-

do de las partículas y sus interacciones? La respuesta puede encontrarse en lo que cabe llamar magia de la cuerda cuántica. Una vez que las reglas de la mecánica cuántica se aplican a una cuerda vibrante —como si fuera una cuerda de violín en miniatura, excepto que las vibraciones se propagan por ella a la velocidad de la luz—, aparecen nuevas propiedades. Todas tienen hondas consecuencias para la física de partículas y la cosmología.

En primer lugar, las cuerdas cuánticas tienen un tamaño finito. Si no fuera por los efectos cuánticos, se podría cortar una cuerda de violín por la mitad, cortarla de nuevo y así sucesivamente, hasta convertirla en una partícula puntual, sin masa. Pero el principio de incertidumbre de Heisenberg finalmente hace su aparición y evita que las

Teoría elemental de cuerdas

La teoría de cuerdas es la principal (aunque no la única) teoría que se propone explicar lo que sucedió en el momento de la gran explosión. Las cuerdas que describe son objetos materiales. Recuerdan a las de un violín. A medida que los violinistas mueven los dedos a lo largo del mástil, acortan las cuerdas y aumentan la frecuencia (y por tanto la energía) de sus vibraciones. Si redujeran una cuerda a una longitud sub-subatómica aparecerían los efectos cuánticos; ya no se la podría acortar más.



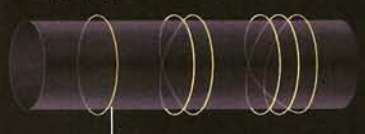
Además de viajar como un todo o de vibrar a lo largo de su longitud, una cuerda subatómica se puede enrollar como un muelle. Supongamos que el espacio tiene una forma cilíndrica. Si la circunferencia es mayor que la longitud mínima permitida de la cuerda, cada aumento en la velocidad de propagación requiere un pequeño incremento de energía, mientras que cada enrollamiento extra exige un incremento grande. Pero si la circunferencia es menor que la longitud mínima, un enrollamiento extra será menos costoso que una cantidad extra de velocidad. La energía neta —lo que en verdad importa— es la misma tanto para circunferencias pequeñas como para las grandes. En realidad, la cuerda no se encoge. Esta propiedad evita que la materia alcance una densidad infinita.



Cuerda viajando en una trayectoria en espiral

CILINDRO GRANDE

Pequeña cantidad de energía necesaria para aumentar la velocidad



Cuerda enrollándose en un cilindro

Gran cantidad de energía necesaria para añadir una vuelta



CILINDRO PEQUEÑO

Gran cantidad de energía necesaria para aumentar la velocidad



Pequeña cantidad de energía necesaria para añadir una vuelta

cuerdas más ligeras se corten en trozos menores que unos 10^{-34} metros. Este irreducible cuanto de longitud, l_s , es una nueva constante de la naturaleza introducida por la teoría de cuerdas, paralelamente a la velocidad de la luz, c , y la constante de Planck, h . Desempeña un papel crucial en casi todos los aspectos de la teoría de cuerdas; establece un límite finito a magnitudes que, de otra manera, podrían hacerse cero o infinito.

En segundo lugar, las cuerdas cuánticas pueden tener momento angular incluso aunque carezcan de masa. En la física clásica, el momento angular es una propiedad de un objeto que gira respecto a un eje. La fórmula del momento angular multiplica entre sí velocidad, masa y distancia al eje; por tanto, un objeto sin masa no puede tener momento angular. Pero las fluctuaciones cuánticas cambian la situación. Una pequeña cuerda puede adquirir hasta dos unidades de h de momento angular sin ganar masa. Esta característica es muy bienvenida, ya que se ajusta a las propiedades de los mediadores de todas las fuerzas fundamentales conocidas, así el fotón (para el electromagnetismo) y el gravitón (para la gravedad). Históricamente, fue el momento angular lo que puso sobre la pista de las implicaciones cuántico-gravitatorias de la teoría de cuerdas.

En tercer lugar, las cuerdas cuánticas exigen la existencia de dimensiones extra del espacio, además de las tres usuales. Una cuerda clásica de violín vibrará con independencia de cuáles sean las propiedades del espacio y el tiempo. Una cuerda cuántica es más exigente. Las ecuaciones que describen la vibración se vuelven incoherentes a menos que el espaciotiempo, o bien esté muy curvado (en contradicción con las observaciones), o contenga seis dimensiones espaciales extra.

Y cuarto, las constantes físicas —las de Newton o de Coulomb, por ejemplo—, que aparecen en las ecuaciones de la física y determinan las propiedades de la naturaleza, ya no tienen valores arbitrarios y fijos. Aparecen en la teoría de cuerdas como campos, bastante parecidos al campo electromagnético, que ajustan sus valores diná-

micamente. Pueden haber tenido diferentes valores en diferentes épocas cosmológicas o en remotas regiones del espacio. Incluso hoy en día las "constantes" físicas podrían variar un poco. La observación de cualquier variación proporcionaría un enorme impulso a la teoría de cuerdas.

Uno de esos campos, el dilatón, es la llave maestra de la teoría de cuerdas; determina la intensidad global de todas las interacciones. El dilatón fascina por su valor: se puede reinterpretar como el tamaño de una dimensión extra del espacio, dando un total de 11 dimensiones al espaciotiempo.

Atar los cabos sueltos

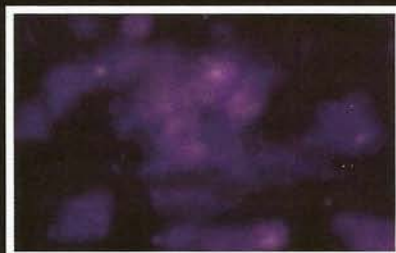
Finalmente, las cuerdas cuánticas han presentado algunas nuevas y sorprendentes simetrías de la naturaleza, las dualidades, que alteran nuestra intuición de qué sucede cuando los objetos se hacen pequeños. Ya he aludido a una forma de dualidad: por lo normal, una cuerda corta es más ligera que una larga, pero si intentamos reducir su tamaño por debajo de la longitud fundamental l_s , se volverá de nuevo pesada.

Otra forma de la simetría, la dualidad T, mantiene que las dimensiones extra pequeñas y grandes son equivalentes. Esta simetría se debe a que las cuerdas pueden moverse de maneras más complicadas que las partículas puntuales. Consideremos una cuerda cerrada (como una sortija) localizada sobre un espacio en forma de cilindro, cuya sección transversal circular represente una dimensión extra finita. Aparte de vibrar, la cuerda puede desplazarse como un todo alrededor del cilindro o enrollarse a su alrededor una o varias veces, como una goma que diese varias vueltas a un tubo (véase el recuadro "Teoría elemental de cuerdas").

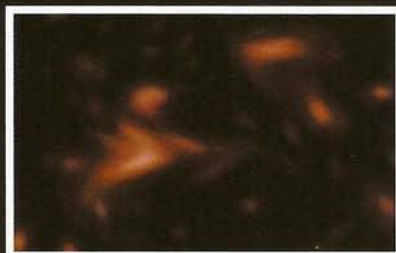
El coste energético de estos dos estados de la cuerda depende del tamaño del cilindro. La energía del enrollamiento es directamente proporcional al radio del cilindro: los cilindros mayores requieren que la cuerda se estire más para enrollarse a su alrededor; por tanto, el enrollamiento contendrá más energía que la que contendría en un cilin-

LA HIPOTESIS DE LA EPOCA PREVIA A LA GRAN EXPLOSION

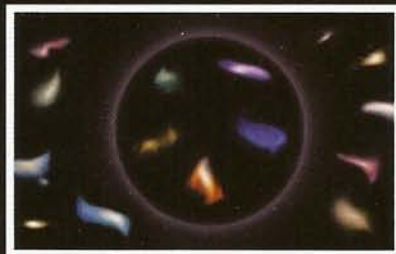
UN INTENTO PRIMERO de aplicar la teoría de cuerdas a la cosmología fue la hipótesis de la pre-gran explosión, según la cual la explosión no es el origen último del universo, sino una transición. Antes, la expansión se aceleraba; después se desaceleró (por lo menos en un principio). La trayectoria de una galaxia por el espaciotiempo (*derecha*) tendría la forma de una copa de vino.



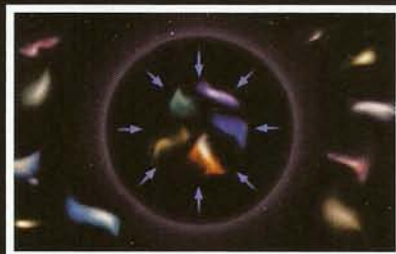
El universo ha existido desde siempre. En el pasado remoto, estaba casi vacío. Las fuerzas, como la gravitación, eran débiles de por sí.



Las fuerzas se fueron intensificando; la materia empezó a acumularse. En algunas regiones se hizo tan densa, que se formó un agujero negro.



Dentro del agujero, el espacio se expandió a un ritmo acelerado. La materia del interior se desconectó de la materia exterior.



Dentro del agujero la materia cayó hacia el centro y aumentó su densidad hasta que alcanzó el límite impuesto por la teoría de cuerdas.



Cuando la materia alcanzó la densidad máxima permitida, los efectos cuánticos provocaron que rebotara en una gran explosión. Fuera, se empezaron a formar otros agujeros, cada uno de ellos un universo distinto.

dro más pequeño. La energía asociada con el movimiento en torno al círculo, por otro lado, es inversamente proporcional al radio: los cilindros mayores permiten longitudes de onda más largas (menores frecuencias), lo que representa me-

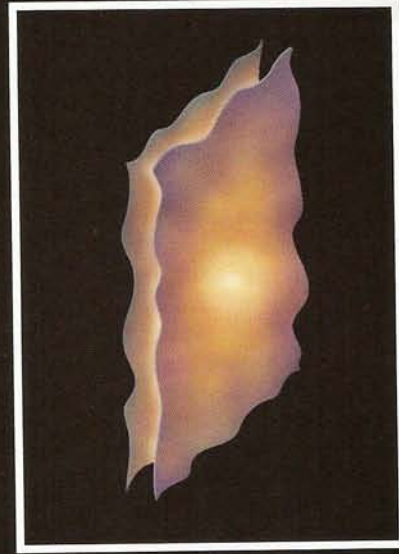
nos energía que las longitudes de onda cortas. Si se sustituye el cilindro grande por otro pequeño, los dos estados de movimiento pueden permutar sus papeles. Las energías que había producido el movimiento circular, se producirán ahora por los

EL MODELO ECPIROTICO

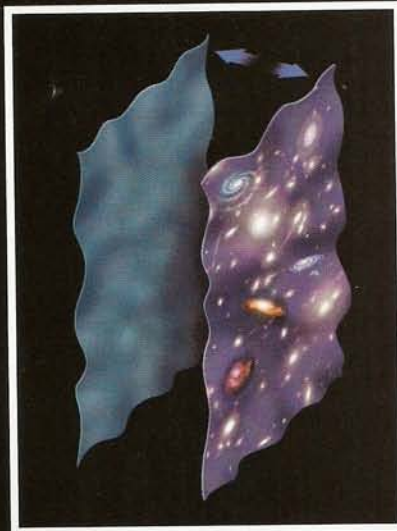
Si nuestro universo es una membrana multidimensional, o simplemente una "brana", moviéndose por un espacio de más dimensiones, la gran explosión podría haber sido la colisión de nuestra brana con una brana paralela. Las colisiones podrían ocurrir cíclicamente. Cada galaxia sigue una trayectoria con forma de reloj de arena a través del espacio-tiempo (*abajo*).



Dos branas casi vacías se atraen entre sí. Cada una se está contrayendo en una dirección perpendicular a su movimiento.



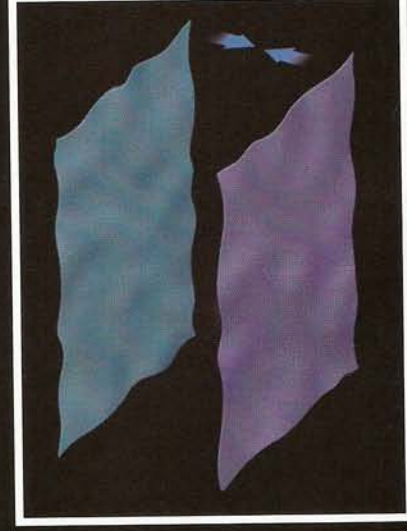
Las branas chocan, convirtiendo sus energías cinéticas en materia y radiación. Esta colisión es la gran explosión.



Las branas rebotan. Empiezan a expandirse a un ritmo desacelerado. La materia se agrupa en estructuras tales como los cúmulos de galaxias.



En el modelo cíclico, a medida que las branas se separan, la fuerza atractiva entre ellas las frena. La materia se reduce.



Las branas acaban de separarse y empiezan a acercarse. Durante la inversión, cada brana se expande a un ritmo acelerado.

enrollamientos, y viceversa. Un observador exterior sólo nota los niveles de energía, no el origen de dichos niveles. Para tal observador, los radios grandes y los pequeños son físicamente equivalentes.

Aunque la dualidad T se suele formular para espacios cilíndricos, en los que una dimensión (la circunferencia) es finita, hay una variante

que se aplica a nuestras tres dimensiones corrientes, que nos parece que cabe estirar indefinidamente. Se debe ser cuidadoso al hablar de la expansión de un espacio infinito. Su tamaño global no puede cambiar; sigue siendo infinito. Pero sí se puede expandir en el sentido de que los cuerpos de su interior —las galaxias— se alejen

unos de otros. La variable crucial no es el tamaño del espacio como un todo, sino su factor de escala, el factor por el que la distancia entre galaxias cambia; se manifiesta en el desplazamiento hacia el rojo de la luz galáctica que los astrónomos observan. Según la dualidad T, universos con pequeños factores de escala son equivalentes a los de

factores de escala grandes. Una tal simetría no aparece en las ecuaciones de Einstein. Surge de la unificación, implícita en la teoría de cuerdas; al dilatón le toca ahí un papel central.

Durante años, los teóricos de las cuerdas pensaron que la dualidad T se aplicaba sólo a las cuerdas cerradas y no a las cuerdas abiertas, que tienen cabos sueltos y, por tanto, no se pueden enrollar. En 1995 Joseph Polchinski, de la Universidad de California en Santa Barbara, observó que la dualidad T se aplica también a las cuerdas abiertas, siempre que el cambio entre radios grandes y pequeños se acompañe de un cambio en las condiciones en los puntos finales de la cuerda. Hasta entonces, se habían dictado condiciones de contorno en las que ninguna fuerza actuaba en los extremos de las cuerdas, dejándolos libres para moverse. Bajo la dualidad T, estas condiciones se convierten en las llamadas condiciones de contorno de Dirichlet y los extremos quedan fijos.

Cualquier cuerda dada puede mezclar ambos tipos de condiciones de contorno. Por ejemplo, los electrones pueden ser cuerdas cuyos extremos se mueven libremente en tres de las 10 dimensiones espaciales, pero están fijos en las otras siete. Aquellas tres dimensiones forman un subespacio conocido como membrana de Dirichlet, o D-brana. En 1996 Petr Horava, de la Universidad de California en Berkeley, y Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, propusieron que nuestro universo reside en una tal brana. La movilidad parcial de los electrones y de otras partículas explica por qué somos incapaces de percibir las diez dimensiones del espacio en todo su esplendor.

Domesticar el infinito

Las mágicas propiedades de las cuerdas cuánticas apuntan a una misma conclusión: las cuerdas aborrecen el infinito. Como no pueden contraerse hasta convertirse en un punto infinitesimal, evitan las paradojas que un colapso así entraña. Su tamaño no nulo y nuevas simetrías establecen límites superiores a las magnitudes físicas que aumentan

ilimitadamente en las teorías ordinarias, e imponen cotas inferiores a las que decrecen. Los teóricos de cuerdas piensan que cuando se proyecta la historia del universo hacia atrás en el tiempo, la curvatura del espaciotiempo va aumentando. Pero en vez de ir creciendo hasta el infinito (hasta la tradicional singularidad de la gran explosión), acaba por alcanzar un máximo y se reduce otra vez. Antes de la teoría de cuerdas, difícil era imaginar mecanismos que eliminasen tan limpiamente la singularidad.

Las condiciones cerca del tiempo cero de la gran explosión eran tan extremas, que aún no se sabe cómo resolver las ecuaciones. Sin embargo, los teóricos de cuerdas han aventurado hipótesis acerca del universo anterior a la gran explosión. Están tomando en consideración dos modelos sobre todo.

El primero, que establece la existencia de una época previa a la gran explosión —mis compañeros y yo empezamos a desarrollarlo en 1991—, combina la dualidad T con la simetría, más conocida por todos, de la inversión temporal, según la cual las ecuaciones de la física valen tanto cuando se las aplica hacia atrás en el tiempo como cuando se las aplica hacia delante. La combinación da lugar a nuevas cosmologías posibles en las que el universo se expande, digamos que cinco segundos antes de la gran explosión, a la misma velocidad que cinco segundos después. Pero el cambio de la expansión era opuesto en los dos instantes; si se estaba desacelerando después, antes se aceleraba. En pocas palabras: la gran explosión podría no haber sido el origen del universo, sino sólo una violenta transición desde la aceleración a la desaceleración.

La belleza de este modelo es que incorpora de manera automática la gran intuición de la teoría inflacionaria estándar: que el universo debió sufrir un período de aceleración a fin de quedar tan homogéneo e isótropo. En la teoría estándar, la aceleración ocurre después de la gran explosión debido a un campo, el inflatón, *ad hoc*. En el modelo de la pre-gran explosión, ocurre antes de la explosión, como un resultado natural de las nuevas simetrías de la teoría de cuerdas.

Según esa hipótesis, el universo pre-explosivo era casi una imagen especular perfecta del que siguió a la explosión (véase el recuadro “La hipótesis de la época previa a la gran explosión”). Si el universo es eterno hacia el futuro, con su contenido enrareciéndose hasta convertirse en un caldo diluido, también será eterno hacia el pasado. Infinitamente antes, estaba casi vacío; sólo contenía un gas tenue, muy disperso y caótico, de radiación y materia. Las fuerzas de la naturaleza, controladas por el campo del dilatón, eran tan débiles que las partículas del gas, apenas si interaccionaban.

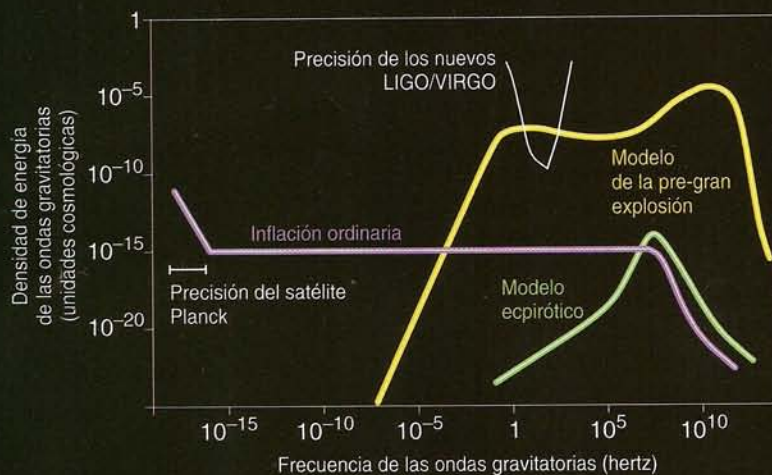
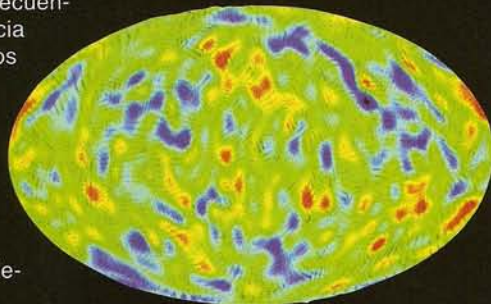
A medida que transcurrió el tiempo, las fuerzas ganaron intensidad y tendieron a agrupar la materia. Aleatoriamente, algunas regiones acumularon materia a expensas de sus entornos. Por último, la densidad en estas regiones se hizo tan alta, que empezaron a formarse agujeros negros. La materia del interior de esas regiones se desconectó entonces del exterior. El universo se partió en fragmentos desconexos.

Dentro de un agujero negro, el espacio y el tiempo intercambian papeles. El centro del agujero negro no es un punto del espacio sino un instante de tiempo. A medida que la materia se precipitaba hacia el centro, alcanzaba densidades más y más altas. Pero cuando la densidad, la temperatura y la curvatura adquirieron los valores máximos permitidos por la teoría de cuerdas, rebotaron y empezaron a decrecer. El momento de esta inversión es lo que llamamos gran explosión. El interior de uno de esos agujeros negros se convirtió en nuestro universo.

No es sorprendente que un esquema tan poco corriente haya provocado controversias. Andrei Linde, de la Universidad de Stanford, ha argumentado que para que concordase con las observaciones, el agujero negro del que surgió nuestro universo tendría que haberse formado con un tamaño inusualmente grande, mucho mayor que la escala de longitud de la teoría de cuerdas. Una respuesta a esta objeción es que las ecuaciones predicen agujeros negros de todos los tamaños posibles. Resulta que nuestro universo

OBSERVACIONES

LA OBSERVACION del universo anterior a la gran explosión parecerá una tarea imposible, pero puede que sobreviva de esa época una forma de radiación: la radiación gravitatoria. Estas variaciones periódicas del campo gravitatorio se detectarían indirectamente por sus efectos sobre la polarización del fondo cósmico de microondas (*vista simulada inferior*) o bien directamente en observatorios terrestres. Tanto la hipótesis de la época pre-gran explosión como la ecpirótica predicen más ondas gravitatorias de alta frecuencia y menos de baja frecuencia que los modelos inflacionarios ordinarios (*abajo*). Las medidas existentes de varios fenómenos astronómicos no permiten distinguir entre estos modelos, pero las futuras observaciones del satélite Planck y de los observatorios LIGO y VIRGO deberían poder hacerlo.



se formó dentro de uno suficientemente grande.

Una objeción más seria, planteada por Thibault Damour, del Instituto de Altos Estudios Científicos, de Bures-sur-Yvette, y Marc Henneaux, de la Universidad Libre de Bruselas, es que la materia y el espaciotiempo se habrían comportado caóticamente cerca del momento de la explosión, en posible contradicción con la observada regularidad del universo primitivo. Hace poco he propuesto que un estado caótico produciría un denso gas de “agujeros de cuerda” en miniatura, unas cuerdas tan pequeñas y con tanta masa, que estarían al borde de convertirse en agujeros negros. El comportamiento de estos agujeros podría resolver el problema planteado por Damour y Henneaux. Tom Banks, de la Universidad de

Rutgers, y Willy Fischler, de la de Texas en Austin, han ofrecido una solución semejante. También existen otras críticas; está por determinar si han descubierto un fallo fatal de la hipótesis.

Choques de branas

El otro modelo importante de un universo anterior a la explosión es el ecpirótico. [O “a partir del fuego”; se refiere a la creencia de la filosofía estoica en el final y reconstrucción cíclicos del mundo por el fuego.] Lo concibió hace tres años un equipo de cosmólogos y teóricos de cuerdas —Justin Khoury, de la Universidad de Columbia, Paul Steinhardt, de Princeton, Burt A. Ovrut, de la de Pennsylvania, Nathan Seiberg, del Instituto de Estudios Avanzados, y Neil Turok, de la Uni-

versidad de Cambridge—. Se basa en la hipótesis de que nuestro universo es una de muchas D-branas que flotan en un espacio de más dimensiones. Las branas ejercen fuerzas atractivas entre ellas y, ocasionalmente, chocan. La gran explosión consistiría en el impacto de otra brana sobre la nuestra (*véase el recuadro “El modelo ecpirótico”*).

En una variante de este modelo, las colisiones ocurren cíclicamente. Dos branas chocan, rebotan, se separan, se atraen mutuamente, chocan de nuevo, y así sucesivamente. Entre colisiones, las branas son plásticas: se expanden a medida que se alejan y se contraen algo a medida que se vuelven a acercar. Durante la transición, el ritmo de expansión se acelera; la actual expansión acelerada del universo quizás augure una nueva colisión.

Los modelos de la pre-gran explosión y ecpirótico poseen algunas características comunes. Ambos empiezan con un universo grande, frío y casi vacío, y ambos comparten el difícil (y no resuelto) problema de la transición entre la fase previa a la explosión y lo que viene después. Matemáticamente, la principal diferencia entre ambas hipótesis se encuentra en el comportamiento del campo del dilatón. En la pre-gran explosión, el dilatón empieza con un valor pequeño —de manera que las fuerzas de la naturaleza son débiles— y paulatinamente gana intensidad. Lo opuesto sucede en el modelo ecpirótico, donde la colisión ocurre cuando las fuerzas más débiles son.

Los creadores de la teoría ecpirótica esperaban que la debilidad de las fuerzas permitiría analizar el rebote con más facilidad, pero hubieron de enfrentarse de todas formas a las dificultades de las curvaturas grandes. Está por ver si su modelo realmente evita una singularidad. Además, requiere unas muy especiales condiciones para resolver las usuales paradojas cosmológicas. Por ejemplo, las branas a punto de chocar debieron haber sido casi exactamente paralelas entre sí, pues de lo contrario la colisión no podría haber dado lugar a una explosión suficientemente homogénea. La versión cíclica podría resolver este problema, ya que las sucesivas colisiones

siones permitirían que las branas se rectificaran por sí mismas.

Dejando aparte la difícil tarea de justificar plenamente estos dos modelos desde el aspecto matemático, hay que preguntarse si tienen algunas consecuencias físicas observables. A primera vista, ambos podrían parecer un ejercicio, no de física, sino de metafísica, ideas interesantes de las que los observadores nunca podrán probar si son ciertas o no. Tal actitud es demasiado pesimista. Como sucede con los detalles de la fase inflacionaria, los de una posible época pre-explosiva podrían tener consecuencias observables, inscritas sobre todo en las pequeñas variaciones observadas en la temperatura del fondo cósmico de microondas.

En primer lugar, las observaciones muestran que las fluctuaciones de temperatura fueron moldeadas por ondas acústicas durante varios cientos de miles de años. La regularidad de las fluctuaciones indica que las ondas estuvieron sincronizadas. Se han descartado muchos modelos cosmológicos a lo largo de los años porque no podían explicar esta sincronía. Los modelos inflacionario, de la pre-gran explosión y ecpirótico superan esta primera prueba. En los tres, las ondas fueron generadas por procesos cuánticos amplificados durante el período de expansión cósmica acelerada. Las fases de las ondas estaban alineadas.

En segundo lugar, cada modelo predice una diferente distribución de las fluctuaciones de la temperatura con respecto al tamaño angular. La observación ha encontrado que las fluctuaciones de todos los tamaños tienen aproximadamente la misma amplitud. (Las desviaciones discernibles tienen lugar sólo a escalas muy pequeñas, donde las fluctuaciones primordiales han sido alteradas por procesos subsiguientes.) Los modelos inflacionarios reproducen muy bien esta distribución. Durante la inflación, la curvatura del espacio cambió de un modo paulatino; se generaron, pues, fluctuaciones de diferentes tamaños bajo condiciones muy parecidas. En los dos modelos basados en la teoría de cuerdas, la curvatura evolucionó rápidamente, con lo que creció la amplitud de las fluctuaciones de pequeña escala, pero otros procesos

potenciaron las de escalas grandes: todas las fluctuaciones quedaron con la misma intensidad. En el modelo ecpirótico, entre esos otros procesos se incluye la dimensión extra del espacio, la que separa las branas que chocan; en el de la pre-gran explosión, un campo cuántico relacionado con el dilatón, el axión. En resumidas cuentas, los tres modelos se ajustan a los datos.

En tercer lugar, las variaciones de temperatura pueden deberse a dos procesos distintos del universo primitivo: las fluctuaciones de la densidad de materia y las ondulaciones causadas por las ondas gravitatorias. En la inflación intervienen ambos procesos, mientras que en la pre-gran explosión y el modelo ecpirótico predominan las variaciones de densidad. Las ondas gravitatorias de ciertos tamaños dejarían una señal distintiva en la polarización del fondo de microondas [véase "Ecos de la Gran Explosión", por Robert R. Caldwell y Marc Kamionkowski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 2001]. Futuros observatorios, como el satélite Planck de la Agencia Europea del Espacio, captarán esa señal, si existe; se tratará de una contrastación casi definitiva.

Un cuarto examen se refiere a la estadística de las fluctuaciones. En la inflación, las fluctuaciones siguen

una curva con forma de campana, o gaussiana. Lo mismo puede suceder en el caso ecpirótico, mientras que la pre-gran explosión permite apreciables desviaciones de la curva de Gauss.

Los análisis del fondo de microondas no son la única manera de comprobar estas teorías. Con pre-gran explosión debería haber también un fondo aleatorio de ondas gravitatorias en un intervalo de frecuencias que, aunque irrelevante para el fondo de microondas, sería detectable por los futuros observatorios de ondas gravitatorias. Además, debido a que los modelos de la pre-gran explosión y ecpirótico implican cambios en el campo del dilatón, que va acoplado al campo electromagnético, ambos llevarían a fluctuaciones a gran escala del campo magnético; podrían manifestarse vestigios suyos en los campos magnéticos galácticos e intergalácticos.

¿Cuándo empezó el tiempo? Aún no tenemos una respuesta concluyente, pero por lo menos dos teorías potencialmente comprobables mantienen con verosimilitud que el universo —y por tanto el tiempo— existía antes de la gran explosión. Si una u otra son ciertas, el cosmos habría existido siempre, y aunque un día vuelva a derrumbarse sobre sí mismo, no acabará nunca.

El autor

Gabriele Veneziano, físico teórico del CERN, fue el padre de la teoría de cuerdas a finales de los años sesenta; por eso ha recibido este año el premio Heineman, de la Sociedad Americana de Física y del Instituto de Física. En aquel tiempo, se consideró que la teoría fallaba. No lograba su objetivo de explicar el núcleo atómico; Veneziano pronto desvió su atención a la cromodinámica cuántica, a la que hizo importantes contribuciones. Después de que la teoría de cuerdas reapareciera como una teoría de la gravedad en los años ochenta, sería uno de los primeros que la aplicaron a los agujeros negros y la cosmología.

Bibliografía complementaria

SUPERSTRING COSMOLOGY. James E. Lidsey, David Wands y Edmund J. Copeland en *Physics Reports*, vol. 337, n.º 4-5, págs. 343-492; octubre 2000.

FROM BIG CRUNCH TO BIG BANG. Justin Khoury, Burt A. Ovrut, Nathan Seiberg, Paul J. Steinhardt y Neil Turok en *Physical Review D*, vol. 65, n.º 8, Trabajo no.086007; 15 de abril, 2002.

A CYCLIC MODEL OF THE UNIVERSE. Paul J. Steinhardt y Neil Turok en *Science*, vol. 296, n.º 5572, páginas 1436-1439; 24 de mayo, 2002.

EL UNIVERSO ELEGANTE. Brian Greene. Ed. Crítica; Barcelona, 2003.

THE PRE-BIG BANG SCENARIO IN STRING COSMOLOGY. Maurizio Gasperini y Gabriele Veneziano en *Physics Reports*, vol. 373, n.º 1-2, páginas 1-212; enero 2003.